



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Off nl gungsschrift  
10 DE 42 36 296 A 1

21 Aktenzeichen: P 42 36 296.2  
22 Anmeldetag: 28. 10. 92  
43 Offenlegungstag: 5. 5. 94

51 Int. Cl. 5:  
H 01 S 3/106  
H 01 S 3/16  
H 01 S 3/139  
H 01 S 3/06  
G 02 F 1/03  
G 02 F 1/05

DE 42 36 296 A 1

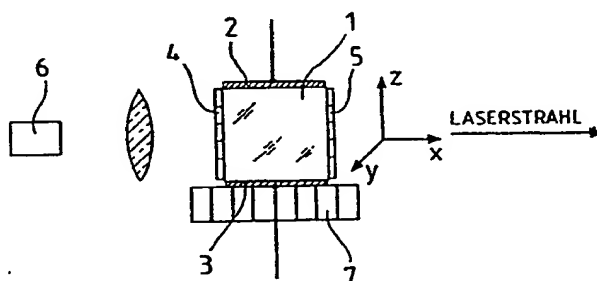
71 Anmelder:  
Deutsche Aerospace AG, 80804 München, DE

72 Erfinder:  
Heinemann, Stefan, Dipl.-Phys., 8000 München, DE;  
Mehnert, Axel, Dipl.-Ing., 8920 Schongau, DE;  
Peuser, Peter, Dr., 8012 Riemerling, DE; Schmitt,  
Nikolaus, Dipl.-Phys., 8000 München, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Abstimbarer Festkörperlaser

57 Die Erfindung bezieht sich auf einen abstimmbaren Festkörperlaser, vorzugsweise für Anwendungen in der schnellen optischen Kommunikation, mit einem elektrooptischen, laseraktiven Kristall wie beispielsweise  $\text{Nd:LiNbO}_3$  geeigneter Orientierung und entsprechendem Schliff, daß dieser Kristall (1) so geschnitten ist, daß die Strahlausbreitung in Richtung der x-Achse oder der y-Achse erfolgt und die z-Achse sowie die y- oder x-Achse jeweils senkrecht zur Strahlausbreitung stehen, und der Kristall (1) mit Elektroden (2, 3) versehen ist, mit deren elektrischem Feld die Emissionswellenlänge des Festkörperlasers variiert werden kann.



DE 42 36 296 A 1

Die Erfindung bezieht sich auf einen abstimmbaren Festkörperlaser gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Aus der US-PS 3 573 653 ist ein optisch gepumpter Halbleiterlaser bekannt, der durch Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes aufgrund des Franz-Keldysh-Effektes durchgestimmt werden kann. Dies ist jedoch nur bei Halbleitern möglich, da der Franz-Keldysh-Effekt auf der Durchtunnelung einer Energieband-Barriere beruht. Halbleiterlaser emittieren aber naturgemäß aufgrund ihrer Energieband-Struktur relativ breitbandig und mehrmodig; single-mode-Laserdioden können nur durch Herstellung von Wellenleiterstrukturen im Halbleitermaterial und der dadurch induzierten spektralen Einengung realisiert werden. Wellenleiterstrukturen aber emittieren mit einer schlechten räumlichen Strahlqualität und einer hohen Divergenz aufgrund der durch die Wellenleiterstruktur verursachten Beugung der Ausgangsstrahlung.

Durch die Anmelderin ist aus P 41 39 859-33 ein abstimmbarer, diodengepumpter Festkörperlaser mit zwei Wellenlängen bekannt, bei denen eine Abstimmung der Differenzfrequenz dadurch erzielt wird, daß im Resonator des Festkörperlaser ein elektrooptisches Material so eingefügt wird, daß bei Anlagen eines äußeren elektrischen Feldes durch Phasenmodulation polarisationsabhängig eine relative Verschiebung der Laserfrequenzen erzeugt wird.

Weiterhin sind von der Anmelderin in P 41 25 720.0-33 Laser beschrieben, die durch Ausnutzung longitudinaler elektrischer Felder, welche parallel zur Laserstrahlrichtung an dotierte Laserkristalle angelegt werden, eine schnelle Abstimmung ermöglichen. Als solche Kristalle erweisen sich elektrostriktive Materialien oder Ferroelektrika wie Nd-dotiertes  $\text{LiNbO}_3$  als vorteilhaft.

Der Vorteil der Verwendung von mit Ionen der Gruppe der Lanthanide dotierten ferroelektrischen Kristalle in der erfindungsgemäßen Anordnung liegt insbesondere gegenüber Halbleitermaterialien in sehr scharfen Energieniveaus und somit einfacher single-frequenz-Erzeugung.

Bisher sind solche Kristalle in der erfindungsgemäßen Anordnung nicht bekannt geworden, insbesondere deshalb, da mit herkömmlichen lampengepumpten Festkörperlaser nur mit sehr großem Aufwand single-frequency-Betrieb möglich war. Die hier vorgeschlagene einfache Lösung der Verwendung von Mikrokristall-Resonatoren ist erst mit der Verwendung von Laserdioden als Pumplichtquelle möglich geworden.

Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Mikrokristall-Resonatoren liegt in der hierbei geringen Linienbreite der Laserstrahlung wie auch in einem großen Durchstimmbereich aufgrund des großen Modenabstandes sowie einer besonders effizienten Abstimmung auch deshalb, weil der gesamte oder ein Großteil des Resonators bei Mikrokristall-Resonatoren vom ferroelektrischen Medium ausgefüllt wird und so die Brechungsindexänderung eine sehr weite Abstimmung hervorruft, wobei zusätzlich die Modulationsbandbreite aufgrund der gering gehaltenen Kapazitäten äußerst groß ist.

ND-dotiertes  $\text{LiNbO}_3$  ist bisher aufgrund photorefraktiver Effekte als Mikrokristall-Lasermaterial nicht weiter bekannt geworden. Neuerdings können die Nachteile jedoch zum Beispiel durch eine Mg-Kodotie-

rung vermieden werden (Untersuchungen insbesondere an Wellenleiterstrukturen siehe Lallier et. al, Optics Letters Vol. 15, No. 12, June 15, 1990 sowie an makroskopischen multi-line-Lasern siehe Cordova-Plaza et al, Optics Letters March 1988, Vol. 13, No. 3).

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Maßnahmen aufzuzeigen, mit denen spektral schmalbandige und unter einer geringen Divergenz austretende Laserstrahlung im single-longitudinal-Mode erzeugt werden kann, welche unter Ausnutzung elektrooptischer Eigenschaften des Lasermaterials mit hoher Effizienz eine schnelle und breitbandige Frequenzabstimmung ermöglicht, wobei besonderer Wert auch auf eine einfache mechanische Anordnung gelegt wird.

Diese Aufgabe wird in überraschend einfacher Weise durch die im Anspruch 1 aufgezeigten Maßnahmen gelöst. In den Unteransprüchen sind Ausgestaltungen und vorteilhafte Weiterbildungen angegeben und in der nachfolgenden Beschreibung ist ein Ausführungsbeispiel erläutert sowie in der einzigen Figur der Zeichnung dargestellt, die ein Ausführungsbeispiel in schematischer Darstellung zeigt.

Grundlage dieser Anordnungen stellen ferroelektrische, laseraktive Kristalle mit Abmessungen von beispielsweise  $2 \times 2 \times 0,5$  mm dar, welche im Gegensatz zu Wellenleiterstrukturen eine wesentlich bessere Strahlqualität, insbesondere eine geringere Divergenz aufweisen. Zur Erfüllung der gestellten Aufgabe sind die Kristalle nun so geschnitten, daß die Strahlausbreitung in Richtung der x- oder y-Achse erfolgt, die z-Achse sowie die y- oder die x-Achse jeweils senkrecht zur Strahlausbreitung stehen (sogenannter x- oder y-cut). Ein so geschnittener Laserkristall emittiert z. B. im Falle  $\text{Nd:LiNbO}_3$  vorzugsweise in Richtung parallel zur z-Achse polarisierte Strahlung, da hier die  $\pi$ -Polarisation die höhere Verstärkung aufweist.

Legt man nun transversal an den Kristall 1 — wie er in der Figur der Zeichnung skizziert ist — ein elektrisches Feld mittels der Elektroden 2, 3, welche beispielsweise direkt auf den Kristallflächen aufgedampft sind, parallel zur z-Achse an, so variiert die optische Kristalllänge  $n \cdot l$  mit

$$1/2 \cdot 1 \cdot n^3_e \cdot r_{33} \cdot E_z$$

Hierbei ist mit  $n_e$  der Brechungsindex des außerordentlichen Strahles, mit  $r_{33}$  der elektrooptische Koeffizient, mit  $E_z$  der Betrag des Feldes in z-Richtung und mit  $l$  die mechanische Länge des Kristalls bezeichnet.

Wie bekannt, resultiert eine Änderung der optischen Kristall-Länge des Laserkristalls auch in einer Änderung der optischen Resonatorlänge und somit in einer Wellenlängenänderung des Lasers.

Im Unterschied zu P 41 25 720.0-33 ist bei erfindungsgemäßer Verwendung eines transversalen Feldes zur elektrooptischen Durchstimmung ein spezieller Kristallschnitt möglich, bei dem die z-Achse des Kristalles senkrecht zur Strahlrichtung orientiert ist und das elektrische Feld parallel zur z-Achse angeordnet ist. Dieser Kristallschnitt hat den Vorteil, daß der Laser polarisiertes Licht entsprechend der Doppelbrechung des Mediums emittiert, insofern der verwendete Wirtskristall doppelbrechend ist. Dies trifft im allgemeinen auf die meisten mit seltenen Erden dotierbaren ferroelektrischen Wirtskristalle (wie z. B. Nd in  $\text{LiNbO}_3$ ; es können jedoch auch andere Wirtsmaterialien oder Dotieratome verwendet werden) zu, welche fast alle entweder trigonal (wie z. B. auch  $\text{LiTaO}_3$ ) oder tetragonal (wie z. B.

KDP und Äquivalente) aufgebaut sind.

Da der elektrooptische Effekt trägheitslos verläuft und die Kapazitäten der Kristalle sehr klein gehalten werden können, kann eine solche Abstimmung sehr schnell mit sehr hohen Bandbreiten erfolgen. Um nun "single-frequency" zu erhalten, wird der Laserkristall monolithisch — also beide Resonatorspiegel 4, 5 direkt auf den Kristallflächen aufgebracht — so ausgeführt, daß eine hinreichend kurze Resonatorlänge — beispielsweise 0,5 mm, aufgrund des spatial-hole-burning die Emission nur einer Resonatorlinie zuläßt, oder aber zumindest halbmonolithisch ausgeführt, so daß mindestens einer der beiden Spiegel auf dem Kristall aufgebracht ist (siehe hierzu z. B. Demtröder, "Laser Spectroscopy", Springer 1982, S. 285/286 sowie insbesondere Siegman "Lasers", Science Books, California 1986, S. 57 und S. 466). Diese Ausführungsform läßt sich sehr gut longitudinal mit einer oder mehreren Laserdioden 6 optisch pumpen.

Bei Ausnutzung des elektrooptischen Effektes in dotierten Ferroelektrika aus dielektrischem Material mit scharfen Energieniveaus (wie z. B. Nd in  $\text{LiNbO}_3$ ) ist es somit möglich, aufgrund der schmalen Verstärkungsbandbreite des Dotierions (wiederum bedingt durch die Schmalbandigkeit der Laserniveaus) sehr geringe Linienbreiten zu erzielen (typisch kleiner 10 kHz).

Um zusätzliche thermisch induzierte Wellenlängenänderungen entweder zu vermeiden oder aber als zusätzliche Möglichkeit einer langsamen Abstimmung über einen großen Wellenlängenbereich auszunutzen, kann der Laserkristall auf einem Kühler oder Heizelement 7 montiert werden.

Eine effiziente Ausnutzung des elektrooptischen Effektes ist in der erfindungsgemäßen Anordnung dadurch gegeben, daß das elektrische Feld transversal an den Kristall (das Ferroelektrikum) angelegt wird und somit der elektrooptische Koeffizient  $r_{33}$  ausgenutzt wird, welcher z. B. bei  $\text{LiNbO}_3$  etwa um den Faktor drei größer ist als der Koeffizient  $r_{13}$  (vgl. E Yariv "Optical Waves in Crystals, John Wiley & Sons, Inc. USA", 1983, S. 282 sowie S. 232). Weiterhin ist hierdurch auch ein besonders günstiger und einfacher zu realisierender Aufbau gegeben, da im Gegensatz zu einer Anordnung gemäß US-PS 3 573 653 oder P 41 25 720.0-33 die Elektroden nicht optisch transparent sein müssen und nicht zusammen mit einer optischen Beschichtung (Coating) aufgebracht werden, die Strahlausbreitung ist hierbei senkrecht zum Verlauf des elektrischen Feldes. Die Elektroden können direkt auf den Kristall aufgedampft oder anderweitig aufgebracht werden. Ebenso vereinfacht sich auch die Kontaktierung der Elektroden mit den Anschlußdrähten. Allerdings ist der Effekt auf ferroelektrische Wirtsmaterialien beschränkt und benötigt so eine engere Auswahl der Laserkristallmaterialien als in oben genannten Patentschriften.

In einer speziellen Anordnung kann die oben beschriebene erfindungsgemäße Anordnung auch zusätzlich zu einem longitudinal angelegten Feld gemäß P 41 25 720.0-33 angewendet werden; hierbei kann eines der beiden Felder, vorzugsweise das transversale Feld unter Ausnutzung des ferroelektrischen Effektes, zur Durchstimmung des Lasers verwendet werden, wohingegen das andere elektrische Feld, vorzugsweise das longitudinale Feld, unter Ausnutzung ferroelektrischer oder aber elektrostriktiver Effekte zu einer zusätzlichen Modulation der Laserfrequenz mit einem periodischen, frequenzkonstanten Feld führt, so daß zusätzlich zur Durchstimmung des Lasers aufgrund der Erzeugung

von Summen- und Differenzfrequenz von Laserfrequenz und Modulationsfrequenz noch Seitenbänder mit der vorzugsweise longitudinalen Feldfrequenz erzeugt werden. Solche Laser, die unter Erzeugung von Seitenbändern in ihrer Frequenz durchgstimmt werden, sind für superheterodyne Meß- und Datenübertragungsverfahren von Bedeutung.

Ebenso kann aber auch das transversale Feld zur Erzeugung der Seitenbänder verwendet werden und eine Durchstimmung des Lasers durch eine Änderung der Kristalltemperatur (thermische Durchstimmung) erfolgen.

#### Patentansprüche

1. Abstimmbarer Festkörperlaser, vorzugsweise für Anwendungen in der schnellen optischen Kommunikation, mit einem elektrooptischen, laseraktiven Kristall wie beispielsweise  $\text{Nd:LiNbO}_3$  geeigneter Orientierung und entsprechendem Schliff, dadurch gekennzeichnet, daß dieser Kristall (1) so geschnitten ist, daß die Strahlausbreitung in Richtung der x-Achse oder der y-Achse erfolgt und die z-Achse sowie die y- oder x-Achse jeweils senkrecht zur Strahlausbreitung stehen, und der Kristall (1) senkrecht zur Strahlausbreitungsrichtung, so daß parallel zur z-Achse ein elektrisches Feld angelegt werden kann, mit Elektroden (2, 3) versehen ist, mit deren elektrischem Feld die Emissionswellenlänge des Festkörperlasers variiert werden kann.
2. Festkörperlaser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektroden (2, 3) auf den zu den Kristallachsen orientiert geschnittenen Kristallflächen direkt aufgedampft oder aufgebracht sind.
3. Festkörperlaser nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserkristall (1) monolithisch mit den Laserresonatorspiegeln (4, 5) bedampft ist.
4. Festkörperlaser nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserkristall (1) halbmonolithisch mit einem Laserresonatorspiegel (4 oder 5) beschichtet ist.
5. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserresonator in seiner Länge so kurz ausgebildet ist, daß auf nur einer longitudinalen Mode emittiert wird.
6. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserkristall (1) longitudinal mit einer oder mehreren Laserdioden (6) optisch gepumpt wird.
7. Festkörperlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserkristall (1) mit einem Kühl- oder Heizaggregat (7) kontaktiert ist.
8. Festkörperlaser nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich zum transversalen Feld ein longitudinales Feld an den Kristall angelegt wird, so daß eine zusätzliche Modulation der Laserstrahlung durch Änderung der optischen Kristall-Länge aufgrund ferroelektrischer oder elektrostriktiver Effekte auftritt.
9. Festkörperlaser nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das longitudinale Feld mit einer festen Frequenz im Bereich von einigen 10 bis 100 MHz moduliert wird.
10. Festkörperlaser nach einem oder mehreren der

Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß das transversale Feld mit einer festen Frequenz im Bereich von einigen 10 bis 100 MHz moduliert wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

